

## KRYTERIA OCENY INTEGRACJI BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH W PRZESTRZENI KONTROLOWANEJ Z PUNKTU WIDZENIA OSIĄGÓW W LOCIE<sup>1</sup>

DANIEL LICHONÓ

*Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Rzeszów*  
*e-mail: d\_lichon@prz.edu.pl*

Proces integracji bezzałogowych statków powietrznych (BSP) w systemie zarządzania ruchem lotniczym (Air Traffic Management, ATM) stanowi odpowiedź na prognozy rozwoju rynku cywilnych BSP w Europie w perspektywie 2035 r.-2050 r. (wg opracowań programu SESAR). Badania nad integracją prowadzone są w obszarach wyzwań technologicznych, regulacji prawnych i akceptacji społecznej. Wymaganiem podstawowym integracji wg ICAO jest, aby BSP spełniały wymagania przestrzeni i procedury operacyjne w sposób równorzędny z lotnictwem załogowym. Proces integracji prowadzi do wdrożenia modelu jednolitej, niesegregowanej przestrzeni powietrznej dla wszystkich użytkowników. Obszarem zainteresowania niniejszej pracy jest integracja BSP w operacjach lotniczych w przestrzeni kontrolowanej w lotach według wskazań przyrządów (ang. Instrument Flight Rules, IFR). Celem pracy jest określenie kryteriów oraz metryk oceny integracji z punktu widzenia osiągnięć BSP. Biorąc pod uwagę, iż BSP są obiektami lżejszymi niż samoloty załogowe, ich osiągnięcia mogą być względnie niższe. Istotnym było wypracowanie kryteriów, wg których można ocenić osiągnięcia BSP z wymaganiami przestrzeni dotyczącymi separacji statków powietrznych i przepływu ruchu lotniczego. Jako krytyczne elementy przestrzeni badano procedury odejścia oraz podejścia (ang. Standard Instrument Departure/Arrival, SID/STAR). Wypracowano kryteria oceny wg położenia BSP względem proceduralnej trajektorii lotu, czasu lotu w procedurach SID/STAR, zgodności BSP z kategorią „A” statków powietrznych, wg ICAO. Zaproponowane kryteria odpowiadają wybranym obszarom rozwoju i oceny rozwiązań ATM (Key Performance Area, KPA), wg ICAO. Praca łączy zagadnienia charakterystyk osiągnięć BSP i aspektów ATM. Stanowi część badań prowadzących do identyfikacji obwiedni osiągnięć BSP określającej możliwość integracji w jednolitej, kontrolowanej przestrzeni powietrznej.

*Słowa kluczowe:* integracja BSP, przestrzeń nie-segregowana, procedury SID i STAR

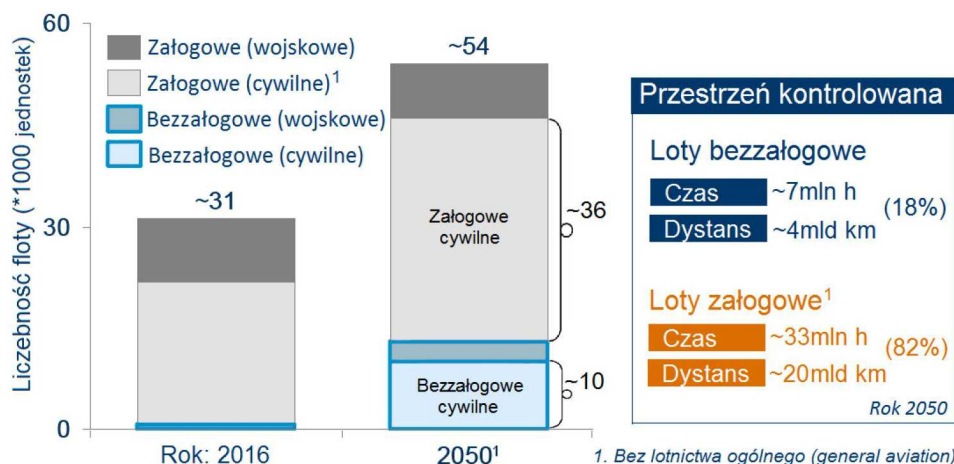
### 1. Wstęp

Lotnictwo jest jedną z kluczowych branż kształtujących funkcjonowanie społeczeństwa i gospodarki na świecie. Podstawowy podział wyróżnia lotnictwo wojskowe i cywilne. W obydwu obszarach występuje lotnictwo załogowe oraz bezzałogowe. Najmłodszą gałęzią lotnictwa jest lotnictwo bezzałogowe cywilne. Jej rozwój otwiera nowe możliwości w zastosowaniach nadzoru, transportu dóbr i transmisji danych. Grupą obiektów będącą obszarem zainteresowania w niniejszej pracy były bezzałogowe statki powietrzne wykonujące loty w przestrzeni powietrznej kontrolowanej. Prognozy dla Unii Europejskiej (UE) wskazują na pięciokrotny wzrost liczebności tej grupy z 5% do 23% względem wszystkich cywilnych statków powietrznych. Względny udział w dystansie i czasie lotu operacji bezzałogowych osiągnie poziom 18% w 2050 r. [25, 26], rys. 1.

Wykorzystanie pełni możliwości bezzałogowych statków powietrznych (BSP) wymaga integracji w istniejącym systemie zarządzania ruchem lotniczym (Air Traffic Management, ATM).

---

<sup>1</sup>Referat wygłoszony podczas XX Konferencji Mechanika w Lotnictwie, ML-XX 2022



Rys. 1. Prognoza liczebności statków powietrznych i operacji lotniczych w przestrzeni kontrolowanej na 2050 r. [26, rys. tłumaczony, zmodyfikowany]

Badania nad integracją prowadzone są w obszarach wyzwań technologicznych, regulacji prawnych i akceptacji społecznej [8-11]. Integracja definiowana jest jako proces odnoszący się do przyszłości, w której spodziewane jest, że zdalnie pilotowany statek powietrzny wejdzie do systemu przestrzeni powietrznej rutynowo bez konieczności stosowania specjalnych warunków – ICAO [16]. Integracja w przestrzeni kontrolowanej prowadzi do wdrożenia modelu jednolitej (niesegregowanej) przestrzeni powietrznej, gdzie wymaga się, aby BSP spełniały wymagania przestrzeni i procedury operacyjne w sposób równorzędny z lotnictwem załogowym [5].

Obszarem zainteresowania niniejszej pracy była integracja BSP w układzie stałopłata w operacjach lotniczych w przestrzeni kontrolowanej w lotach proceduralnych według wskazań przyrządów (ang. Instrument Flight Rules, IFR). Obszar ten stanowi część ewolucyjną procesu integracji oraz klasę VI ruchu bezzałogowego, wg EUROCONTROL, która wymaga dostosowania nowych użytkowników do wymagań przestrzeni powietrznej oraz aktualnego ruchu lotniczego [4, 22, 25]. Stanowi to różnicę w stosunku do integracji obiektów operujących na bardzo małych wysokościach, dla których tworzone są innowacyjne struktury „U-space”. Biorąc pod uwagę, że BSP są zwykle obiektami lżejszymi o różnych osiągnięciach w porównaniu do samolotów załogowych, nasuwają się pytania:

- czy BSP są w stanie spełnić wymagania przestrzeni kontrolowanej?
- w jaki sposób obecność BSP wpływa na przepływ załogowego ruchu lotniczego?

Odnosi się to do uwzględnienia charakterystyk osiągowych BSP w aspektach takich jak parametry procedur w przestrzeni kontrolowanej czy minimum separacji statków powietrznych. Ponadto grupa obiektów BSP jest zróżnicowana pod względem poziomu osiągnięć w locie, co może skutkować, iż nie każdy obiekt spełni wymagania integracji. Niezbędnym staje się wypracowanie kryteriów, według których możliwa będzie ocena integracji BSP w przestrzeni kontrolowanej. Cel pracy sformułowano jako określenie jakościowych i ilościowych kryteriów oceny integracji BSP w przestrzeni kontrolowanej odniesionych do osiągnięć BSP względem lotnictwa załogowego oraz wymagań przestrzeni powietrznej. Kryteria te mają zastosowanie w badaniach symulacyjnych, w których w stosunkowo krótkim czasie sprawdzane jest wiele wariantów działania systemu ATM. System ATM rozumiany był jako lot BSP według określonej procedury IFR. Wariantami działania systemu były zmienne charakteryzujące BSP (masa, obciążenie powierzchni, obciążenie mocy), rodzaj procedury IFR, prędkość i kierunek wiatru. Biorąc pod uwagę, że procedury obowiązujące w przestrzeni kontrolowanej dostosowane są do załogowych statków powietrznych, kryteria integracji odniesiono względem poziomu ich osiągnięć. Osiągnięcia w locie samolotów załogowych uzyskano w symulatorze lotów opartym o oprogramowanie X-Plane11<sup>TM</sup>, wykonując loty

według procedur. Jako procedury IFR w przestrzeni kontrolowanej wybrano procedury odlotu oraz dolotu według wskazań przyrządów (Standard Instrument Departure/Arrival, SID/STAR). Procedury te opisują standardowe ścieżki lotu w rejonach kontrolowanych lotnisk (Terminal Control Area, TMA). Zbudowane są z odcinków lotu zniżającego, horyzontalnego, wznoszącego oraz manewrów proceduralnych, toteż uznano je za kluczowe z punktu widzenia badań nad integracją BSP.

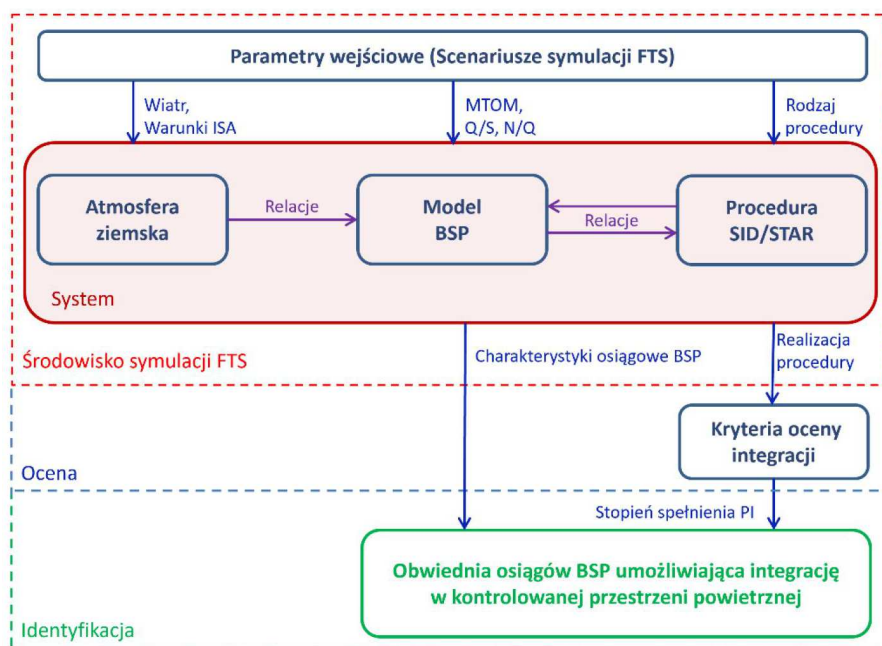
W niniejszej pracy przedstawiono kryteria oceny integracji BSP w przestrzeni kontrolowanej, które łączą osiągi w locie z wymaganiami przestrzeni i wpływem na załogowy ruch lotniczy. Kolejne rozdziały zawierają kontekst przeprowadzonych prac, metody rozwijania nowych rozwiązań ATM (rozdział 2), budowę procedur SID i STAR, klasyfikację statków powietrznych, minima separacji w przestrzeni (rozdział 3), opis kryteriów jakościowych integracji oraz wyznaczenie ich metryk ilościowych (rozdział 4), wnioski (rozdział 5).

## 2. Metodyka badań

W rozdziale przedstawiono szerszy kontekst prac, w którym zagadnienie określenia kryteriów integracji BSP było jedną z części badań. Następnie opisano, w jaki sposób prowadzone są prace badawczo-rozwojowe w zagadnieniach ATM.

### 2.1. Kontekst prac

Badania złożono z trzech etapów, tj. symulacji, oceny, identyfikacji, wg schematu z rys. 2. Scenariuszami symulacji były zmienne wejściowe BSP, rodzaj procedury, prędkość i kierunek wiatru. Na ich podstawie modelowano lot BSP, identyfikując parametry takie jak położenie BSP względem proceduralnej trajektorii, prędkość lotu, czas realizacji procedur. Po tym etapie wykorzystywane są kryteria oceny integracji BSP, będące główną częścią niniejszej pracy. Na ich podstawie zidentyfikowano obwiednię osiągową BSP umożliwiającą spełnienie wymagań przestrzeni powietrznej i minimalizacji wpływu na załogowy ruch lotniczy.

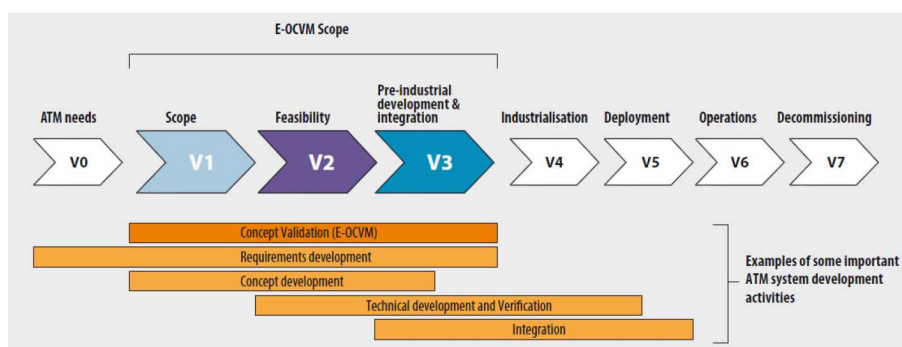


Rys. 2. Schemat badań integracji BSP w procedurach SID i STAR

W badaniach wykorzystano metodę symulacji szybkich (Fast-time simulation, FTS), identyfikując warianty działania systemu. Zbudowano model symulacyjny osiągow BSP, w którym poprzez minimalną liczbę trzech zmiennych wejściowych (masy startowej, obciążenia powierzchni, obciążenia mocy) różnicowano warianty BSP oraz modelowano ich osiągi w locie. Model symulacyjny BSP opisano szerzej w [20]. Następnie zbudowano model procedur referencyjnych SID i STAR. Bazując na statystyce aktualnych map procedur wybranych lotnisk (AIP Polska i innych państw Europy), wyznaczono średnie dystanse, przewyższenia, dominujące gradienty wznoszenia i zniżania oraz wykorzystywane manewry [24]. Przy pomocy wytycznych projektowania procedur ICAO wyznaczono tzw. obszary tolerancji (Minimum Obstacle Clearance, MOC) [15]. Posiadanie procedur referencyjnych, tzn. o reprezentatywnym kształcie, zmniejszyło liczbę wariantów badania systemu, umożliwiając skupienie się na osiągnięciach BSP. Model symulacyjny procedur opisano szerzej w [19, 21]. Parametry procedur referencyjnych były istotne w wyznaczeniu kryteriów integracji BPS, toteż ich schematy przedstawiono w Dodatku 1.

## 2.2. Metody rozwijania rozwiązań ATM

Rozwój systemu ATM, w tym integracja BSP, jest procesem ewolucyjnym. Instytucja EUROCONTROL wyróżnia 8 etapów „cyklu życia” rozwiązań ATM (oznaczone kolejno od V0 do V7), tj. identyfikacja potrzeb, zakres, studium wykonalności, wstępny rozwój, industrializacja, wprowadzenie do użytkowania, użytkowanie operacyjne, wycofanie, [2, 3], rys 3.



Rys. 3. Etapy „cyklu życia” rozwiązań ATM [2]

W etapach zakresu prac (V1), studium wykonalności (V2) i wstępnego rozwoju (V3) wykonywana jest większość prac badawczych, dla których istotny jest dobór metod walidacji rozwiązań. Do metod walidacji zalicza się studium literaturowe, ocenę ekspercką, modelowanie (symulacja) w czasie przyspieszonym, symulacja w czasie rzeczywistym, próby w „trybie cienia” (implementacja rozwiązań w ATM i testy równoległe, w tle), próby „na żywo” (implementacja rozwiązań w ATM i testy czynne).

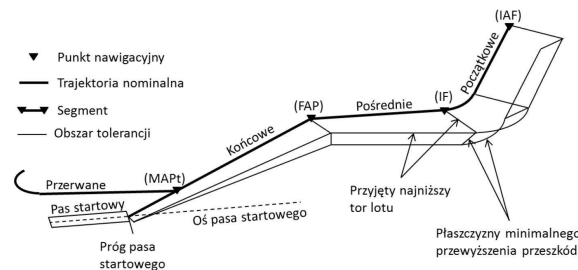
Ponadto ICAO wyróżnia 11 kluczowych obszarów rozwoju ATM (Key Performance Area, KPA), tj. dostępność i równość, pojemność, efektywność kosztów, efektywność lotów (np. minimalizacja opóźnień), środowisko (np. emisja spalin, hałas), elastyczność (np. zdolność do modyfikacji trajektorii), globalna spójność (interoperacyjność), uczestnictwo społeczności ATM, przewidywalność, bezpieczeństwo (lotów), zabezpieczenie (np. błędy ludzkie, cyber-bezpieczeństwo) [13, 14]. W poszczególnych obszarach definiuje się kryteria (wskaźniki) osiągnięcia celów (Performance Indicator, PI), dla których określa się ilościowe metryki.

### 3. Struktury przestrzeni kontrolowanej

W rozdziale zawarto opis struktur przestrzeni kontrolowanej wykorzystanych w badaniach integracji BSP. Zaliczono do nich budowę procedur odlotu oraz dolotu według wskazań przyrządów (SID i STAR) uzupełnioną o klasyfikację statków powietrznych oraz zasady separacji obiektów w lotach w przestrzeni kontrolowanej. Zagadnienia te umożliwiły połączenie aspektów ATM z charakterystykami BSP.

#### 3.1. Budowa procedur SID i STAR

Rolą procedur SID i STAR jest zapewnienie separacji między statkami powietrznymi oraz przeszkodami naziemnymi w operacjach odejścia i podejścia z lotnisk kontrolowanych. Procedury SID i STAR definiowane są jako drogi lotnicze rozmieszczone w strefach TMA, łączące przestrzeń przelotową z progiem pasa startowego. Drogi te tworzą nominalną trajektorię lotu, która otoczona jest obszarem tolerancji wolnym od przeszkód naziemnych. Nominalna trajektoria odlotu i dolotu zbudowana jest z segmentów, w których realizowane są określone etapy lotu, rys. 4.



Rys. 4. Schemat procedury standardowego dolotu wg wskazań przyrządów (STAR)

W procedurze dolotu wyróżnia się 5 segmentów:

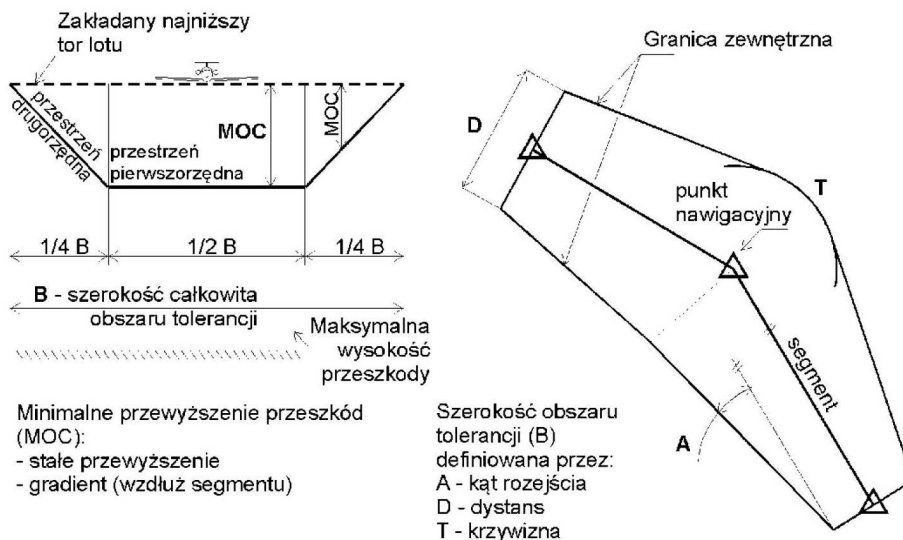
- zbliżanie (Arrival) – segment (lub zbiór segmentów) prowadzących z przestrzeni przelotowej do bezpośredniej bliskości lotniska,
- podejście początkowe (Initial Approach) – segment, w którym wykonywane jest zniżanie i manewr proceduralny prowadzący samolot na kurs odpowiadający przedłużeniu osi pasa startowego,
- podejście pośrednie (Intermediate Approach) – segment, w którym samolot przyjmuje konfigurację do lądowania (wypuszczenie podwozia i wysunięcie klap),
- podejście końcowe/prosta do lądowania (Final Approach) – ustalone, prostoliniowe zniżanie do progu pasa startowego w konfiguracji do lądowania,
- przerwane podejście (Missed Approach) – trajektoria i manewry wykonywane w przypadku przerwania procedury lądowania i przejścia do wznoszenia.

Z kolei procedura odlotu złożona jest z dwóch typów segmentów:

- wznoszenie prostoliniowe – ustalone wznoszenie po oderwaniu od pasa do wysokości (lub punktu) inicjacji zakrętu,
- opuszczenie TMA – dalsze wznoszenie i manewry.

Obszar tolerancji zdefiniowany jest względem nominalnej trajektorii. Horyzontalnie, na wysokości odpowiadającej nominalnej trajektorii, definiowana jest szerokość obszaru, która tworzy powierzchnię nazywaną „zakładaną najniższą ścieżką lotu”. Szerokość może być wyrażona jako stały dystans, kąt rozejścia lub przestrzeń zakrętu. Wertykalnie, poniżej zakładanej najniższej ścieżki lotu, definiuje się minimalny prześwit przeszkód (Minimum Obstacle Clearance, MOC).

MOC wymiarowany jest jako przewyższenie stałe lub gradient wzdłuż segmentu. Obszar tolerancji może być podzielony wzdłuż szerokości na przestrzeń główną i drugorzędą. Przestrzeń główną zajmuje połowę szerokości obszaru, w której MOC jest stałe. Przestrzeń drugorzędą, jeśli jest stosowana, znajduje się po stronie zewnętrznej i posiada MOC malejące liniowo do „zera” ku granicy. Schemat obszaru tolerancji przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat obszaru tolerancji procedur SID i STAR

### 3.2. Klasyfikacja statków powietrznych

Uwzględnienie klasyfikacji statków powietrznych był niezbędne, gdyż inne kryteria obowiązują w lotnictwie bezzałogowym, a inne w lotach w przestrzeni kontrolowanej. Mając na uwadze, że BSP należy dostosować do wymogów przestrzeni porównanie klasyfikacji statków powietrznych umożliwiło wskazanie, która kategoria BSP może różnić się od statków załogowych oraz jakiej odpowiada klasie statków powietrznych w przestrzeni kontrolowanej (dostosowanej do lotnictwa załogowego).

Klasyfikacja BSP dokonywana jest wg zróżnicowanych kryteriów technicznych. Podstawowym kryterium klasyfikacji cywilnych BSP jest masa startowa, wg której występują najczęściej 4 klasy (obiekty bardzo małe, małe, średnie i duże) [6, 7, 18, 23]. Rozwinięciem jest klasyfikacja militarna, w której stosowane są łączone kryteria masy startowej i osiągnięć (wysokość operacyjna i promień działania) [17]. Dodatkowo, ze względu na profil misji, wyróżnia się BSP o wydłużonym czasie lotu operujące na wysokości średniej i dużej (Medium/High-Altitude Long Endurance, MALE/HALE). Klasyfikacja wg prędkości lotu jest rzadko stosowanym kryterium, wyróżnia się kategorie łączone z ogólnym wskazaniem na prędkość maksymalną [1].

Klasyfikację BSP zestawiono w tabeli 1.

Z kolei w procedurach SID i STAR występuje klasyfikacja prędkościowa statków powietrznych. Statki powietrzne podzielono na kategorie A-E i H (śmigłowce), dla których określono prędkości w poszczególnych segmentach procedur [15], tabela 2.

### 3.3. Separacja obiektów w przestrzeni powietrznej

Istotną kwestią w określeniu wpływu BSP na załogowy ruch lotniczy są minima separacji stosowane w procedurach SID i STAR. Stosowana jest separacja czasowa, tj. określający minimalny czas pomiędzy samolotem poprzedzającymi a następującym w operacjach startu/ładowania. Odstęp czasowy jest niezbędny, w celu uniknięcia negatywnego wpływu śladu wirowego samolotów.

**Tabela 1.** Klasyfikacja BSP

Wg masy startowej $m_{TO}$ [kg]	Kryteria łączone	
	Klasa $m_{TO}$ [kg] / wysokość op. [m] / promień dz. [km]	Klasa $m_{TO}$ [kg] / wysokość op. [m] / $V_{max}$ [km/h] IAS
Bardzo małe: < 25	Mikro: < 2 / 60 / 5	I: < 9 kg / 400 / 185
Małe: 25-150	Mini: 2-20 / 900 / 25	II: 9-25 kg / 1000 / 460
Średnie: 150-ok. 450	Małe: 20-150 / 1500 / 50	III: 25-600 kg / 5500 / 460
Duże: >ok. 450	Taktyczne: 150-600 / 3000 / 200 MALE (HALE): >600 / 14(20) · 10 <sup>3</sup> / -	IV: >600 kg / - / -

**Tabela 2.** Klasyfikacja statków powietrznych w procedurach SID i STAR

Kategoria samolotu	$V_{at}$	Zakres prędkości podejścia początkowego	Zakres prędkości na prostej do lądowania	Prędkość maksymalna manewrów z widocznością	Prędkość maksymalna przerwane go podejścia pośrednia/końcowa	Zakres prędkości zniżania na prostej do lądowania [m/min]
A	< 169	165 / 280(205*)	130 / 185	185	185 / 205	120 / 200
B	169 / 223	220 / 335(260*)	155 / 240	250	240 / 280	120 / 200
C	224 / 260	295 / 445	215 / 295	335	295 / 445	180 / 305
D	261 / 306	345 / 465	240 / 345	380	345 / 490	180 / 305
E	307 / 390	345 / 467	285 / 425	445	425 / 510	180 / 305

Prędkości IAS [km/h],  $V_{at}$  – prędkość na progu pasa,

\* prędkość dla manewrów nawrotu

Separacja wynosi 2 lub 3 minuty, w zależności od kategorii śladu wirowego samolotu (Wake Turbulence Category, WTC), który powiązany jest z masą startową samolotu [12], tabela 3.

**Tabela 3.** Separacja czasowa samolotów w procedurach SID i STAR

Samolot poprzedzający	Samolot następujący	Minimum separacji, minuty – komentarz
ciężki	ciężki	nieokreślone
MTOM ≥ 136000 kg	średni	2 – lądowanie 2 lub 3 – start*
	lekki	3 – lądowanie 2 lub 3 – start*
średni 7000 kg < MTOM < 136000 kg	lekki	3 – lądowanie 2 lub 3 – start*
lekki MTOM ≤ 7000 kg	lekki	nieokreślone

\* Start z tej samej drogi startowej, różna separacja w zależności od wykorzystania pełnej lub częściowej długości drogi startowej

#### 4. Kryteria integracji

W rozdziale przedstawiono opis kryteriów oceny integracji BSP w jednolitej przestrzeni powietrznej w lotach według procedur SID i STAR. Rezultaty w postaci kryteriów jakościowych

wpracowano w oparciu o kontekst badań i metody rozwoju rozwiązań ATM (rozdz. 2). Następnie, wykorzystując parametry procedur referencyjnych, budowę procedur, klasyfikację statków powietrznych i minima separacji (rozdz. 3, dodatek 1) określono metryki ilościowe kryteriów. W przypadku wybranych metryk niezbędnym było wykorzystanie symulatora lotów samolotu załogowego X-Plane11<sup>TM</sup>, w celu uzyskania danych porównawczych lotów według procedur referencyjnych.

#### 4.1. Wybór kryteriów jakościowych

Ocenę możliwości integracji BSP w procedurach SID i STAR z punktu widzenia osiągnięć samolotu w locie dokonano w dwóch obszarach rozwoju ATM (Key Performance Area, KPA), tj. bezpieczeństwo i efektywność lotów. W wymienionych obszarach przyjęto następujące kryteria oceny (Performance Indicator, PI):

- bezpieczeństwo:
  - PI-1: podążanie wzdłuż proceduralnej trajektorii lotu na kierunku horyzontalnym i wertykalnym – kryterium położenia,
- efektywność lotów:
  - PI-2: wpływ BSP na załogowy ruch lotniczy – kryterium czasu,
  - PI-3: spełnienie warunków kategorii A dla procedur SID i STAR – kryterium czasu i prędkości.

Wybrane dwa obszary KPA powiązane są z wymaganiami integracji, które dotyczyły spełnienia wymagań przestrzeni i minimalizacji negatywnego wpływu na aktualny ruch lotniczy. Bezpieczeństwo jest aspektem, który powinien być uwzględniony w każdym z aspektów rozwoju lotnictwa. Wybór kryterium położenia (PI-1) motywowano poruszaniem się BSP wzdłuż trajektorii zapewniającej bezpieczny dołot do progu pasa startowego lub opuszczenia strefy lotniska (TMA) z dala od przeszkód terenowych. Następnie kryterium czasu (PI-2) w obszarze efektywności odpowiadało za minimalizację opóźnień w operacjach startu i lądowania przy zachowaniu minimów separacji obiektów. Finalnie w kryterium czasu i prędkości (PI-3) sprawdzano, czy BSP przynależy do kategorii A w procedurach SID i STAR z punktu widzenia czasu lotu wynikającego z dystansu procedur i poziomów prędkości kategorii „A” oraz spełnienia wymaganych prędkości lotu w poszczególnych segmentach.

#### 4.2. Wyznaczenie kryteriów ilościowych

Sformułowano dwa wymagania przy wyznaczaniu kryteriów ilościowych:

- proste w interpretacji,
- stosowane w nieziennej formie w różnych scenariuszach symulacji.

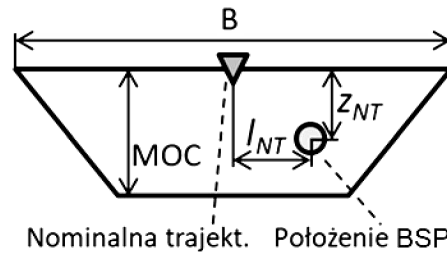
##### 4.2.1. Kryterium PI-1

Podczas lotu samolot może z pewną dokładnością położenia podążać wzdłuż proceduralnej trajektorii ze względu na dokładność urządzeń automatycznego sterowania, poprawność manualnego pilotowania, wpływ wiatru czy poziom osiągnięć umożliwiające lot według trajektorii. W kryterium PI-1 mierzono, czy samolot pozostaje w obszarze tolerancji procedur, rys. 6. Metryką ilościową kryterium PI-1 była odległość BSP od proceduralnej trajektorii wyrażona względem szerokości i przewyższenia obszaru tolerancji procedury. Przyjęto stałą wartość dopuszczalnej względnej odchyłki położenia na kierunku horyzontalnym  $\lambda$  i wertykalnym  $\zeta$

$$\lambda = \frac{2l_{NT}}{B} \leq 0,45 \quad \zeta = \frac{|z_{NT}|}{MOC} \leq 0,45 \quad (4.1)$$

oznaczenia w zależnościach (4.1) przedstawiono na rys. 6.



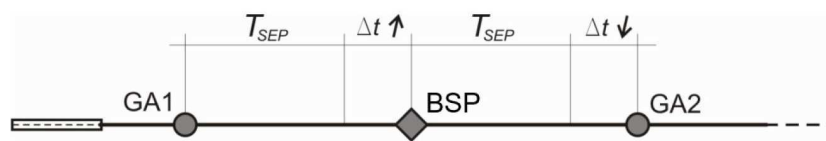


Rys. 6. Interpretacja położenia BSP względem trajektorii nominalnej (kryterium integracji PI-1)

Metryka ta niezależnie od rodzaju obszaru tolerancji (zakręty, segmenty podejścia, manewry proceduralne, szerokość pasa startowego) dopuszczała swobodę położenia BSP w realizacji procedur, zapewniając odpowiednio wczesne wykrycie braku możliwości lotu zgodnie z proceduralną trajektorią. Pomimo że powyżej nominalnej trajektorii nie ma zdefiniowanego dystansu MOC, położenie wertykalne BSP ograniczono wg zależności (4.1)<sub>2</sub> w celu uniknięcia np. końcowego zniżania przy dużym kącie toru lotu, w którym utrzymanie prędkości podejścia jest utrudnione.

#### 4.2.2. Kryterium PI-2

W jednolitej przestrzeni powietrznej BSP operuje wraz z samolotami załogowymi. Punktem odniesienia zatem powinny być osiągi samolotu załogowego i wynikający z nich czas realizacji procedur. Do porównań wybrano lekki samolot załogowy z napędem śmigłowym klasy „General Aviation”, gdyż te konstrukcje uznano za najbliższe badanym BSP. W ocenie wpływu BSP na załogowy ruch lotniczy przyjęto uproszczony scenariusz ruchu lotniczego, w którym BSP wykonuje start lub lądowanie w kolejce pomiędzy samolotami załogowymi poprzedzającym GA1 i następującym GA2, rys. 7. Przyjęto takie same osiągi GA1 i GA2, osiągi BSP zmniejszone względem GA, separację czasową obiektów  $T_{SEP} = 3$  min. Wówczas, pomiędzy samolotem poprzedzającym GA1 a BSP stale narasta odstęp czasowy  $\Delta t$ , natomiast pomiędzy BSP a samolotem następującym odstęp ten zmniejsza się  $-\Delta t$ . Oznacza to, że samolot następujący GA2 może rozpocząć wykonywanie procedury z pewnym opóźnieniem  $\Delta T_{GA2}$ , aby na całym dystansie procedury, zmniejszając odstęp do BSP, nie naruszyć minimum separacji  $T_{SEP}$ . Należy określić warunki, w których minimum separacji  $T_{SEP}$  będzie zawsze zachowane.



Rys. 7. Scenariusz ruchu lotniczego (kryterium integracji PI-2)

Przyjęto warunek, że granica dopuszczalnego opóźnienia GA2 jest równa minimum separacji

$$\Delta T_{GA2} = T_{SEP} \quad (4.2)$$

tzn. że obecność BSP opóźnia rozpoczęcie procedury przez GA2 o 100%  $T_{SEP}$ .

Metrykę spełnienia kryterium PI-2 zdefiniowano jako względny czas lotu BSP odniesiony do czasu lotu samolotu załogowego GA w procedurze referencyjnej  $\tau_{BSP-GA}$

$$\tau_{BSP-GA} = \frac{T_{BSP}}{T_{GA}} \quad (4.3)$$

wówczas

$$\tau_{BSP-GA} \leq 1 \quad (4.4)$$

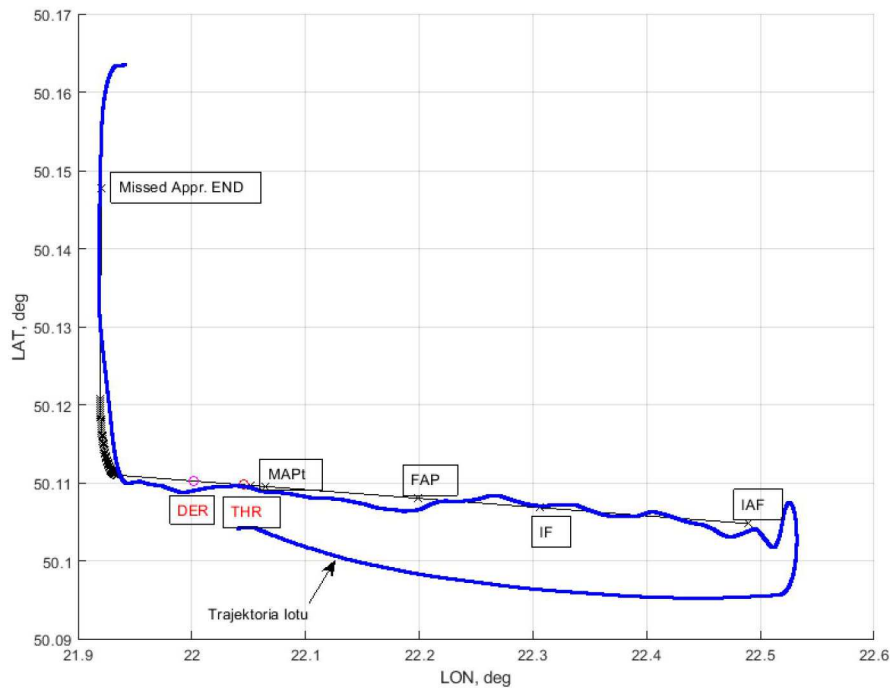
interpretowano jako brak wpływu BSP na ruch załogowy, brak opóźnień, osiągi BSP porównywalne z samolotami załogowymi.

Natomiast dla

$$\tau_{BSP-GA} > 1 \quad (4.5)$$

występował wpływ na załogowy ruch lotniczy.

Graniczną wartość (4.5), która spełnia warunek (4.2) określono indywidualnie dla każdej procedury referencyjnej na podstawie dystansu procedury  $L_{PROCED}$ , średniej prędkości samolotu załogowego  $U_{srGA}$  i BSP  $U_{srBSP}$ , czasu realizacji procedury przez samolot załogowy  $T_{GA}$  i BSP  $T_{BSP}$ . Parametry lotu samolotu załogowego  $U_{srGA}$ ,  $T_{GA}$  uzyskano, wykonując serię lotów testowych w symulatorze lotu opartym o środowisko X-Plane11. Wczytano parametry procedur referencyjnych w lokalizacji lotniska Rzeszów-Jasionka (EPRZ), wykonując manualnie po 3 loty w każdej z procedur oraz uśredniając rezultaty. Przykładowy zapis realizacji lotów przedstawiono na rys. 8 i 9. Następnie określono, jakie powinny być parametry lotu BSP ( $U_{srBSP}$ ,  $T_{BSP}$ ), aby na dystansie danej procedury spełnić warunek (4.2). Finalnie określono względną granicę  $\tau_{BSP-GA}$  spełniającą warunek (4.2). Rezultaty zbiorcze zestawiono w tabeli 4. Wykazano, że kryterium PI-2 jest spełnione, jeżeli względny czas lotu BSP odniesiony do czasu lotu samolotu załogowego jest nie większy niż 14% w procedurach dolotu STAR oraz 24% i 34% w procedurach odlotu prostego i z zakrętem (SID).



Rys. 8. Lot wg procedury referencyjnej podejścia prostego z przerwaniem podejścia – zapis położenia samolotu (skala osi współrzędnych geogr. nieproporcjonalna)

#### 4.2.3. Kryterium PI-3

Kategoria A w procedurach SID i STAR odnosi się do najmniejszych prędkości lotu, które korespondują z samolotami lekkimi klasy „General Aviation”. Samoloty BSP, których osiągi mogą odróżniać się od kategorii A, to głównie obiekty małe i średnie o masie startowej w zakresie 25 kg-450 kg. Stwierdzono, że małe i średnie BSP należy oceniać względem przynależności do najbliższej z możliwych kategorii, tj. kategorii A. W kryterium PI-3 wyróżniono dwie ilościowe metryki oceny integracji:



Rys. 9. Środowisko symulacji X-plane11 – przykład: implementacja procedury referencyjnej podejścia dwuzakrętowego „racetrack”

Tabela 4. Metryki oceny wpływu BSP na załogowy ruch lotniczy (PI-2)

Procedura*	$L_{PROCED}$ [km]	$U_{srGA}^{**}$ [km/h]	$U_{srBSP}$ [km/h]	$T_{GA}^{**}$ [min]	$T_{BSP}$ [min]	$\tau_{BSP-GA}$ [-]
STAR_ST	31,64	184	160	10,30	11,87	1,15
STAR_TR	31,39	187	163	10,10	11,58	1,15
STAR_BST	37,80	193	171	11,78	13,26	1,13
STAR_RCT	36,79	183	162	12,07	13,62	1,13
STAR średnie***	34,4	187	164	11,04	12,5	1,14
SID_ST	20,08	191	154	6,30	7,82	1,24
SID_TR	13,65	181	136	4,53	6,02	1,33

\* akronimy wskazujące rodzaj procedury opisano w dodatku 1

\*\* na podstawie lotów w symulatorze

\*\*\*  $\tau_{BSP-GA}$  w STAR jest zbliżone – przyjęto średnią wartość

- PI-3a: czas lotu BSP odniesiony do maksymalnego czasu lotu w procedurze referencyjnej,
- PI-3b: prędkości wskazywane (IAS) BSP względem minimalnych prędkości określonych w segmentach procedur.

Powyższe metryki muszą być spełnione jednocześnie, aby wykazać przynależność BSP do kategorii A.

Pierwsza z metryk sprawdzała w skali całej procedury czas lotu BSP ( $T_{BSP}$ ) w porównaniu do maksymalnego czasu lotu ( $T_{kat.A}^{max}$ ) wynikającego z dystansu segmentów i minimalnych prędkości lotu kategorii A w danym segmencie. Metrykę spełnienia kryterium PI-3a zdefiniowano jako względny czas lotu BSP odniesiony do maksymalnego czasu lotu w procedurze referencyjnej wg kategorii A ( $\tau_{BSP-kat.A}$ )

$$\tau_{BSP-kat.A} = \frac{T_{BSP}}{T_{kat.A}^{max}} \quad (4.6)$$

wówczas minima kategorii A są spełnione dla

$$\tau_{RPA-kat.A} \leq 1 \quad (4.7)$$

oraz niespełnione dla

$$\tau_{RPA-kat.A} > 1 \quad (4.8)$$

Maksymalne czasy lotu w procedurach referencyjnych wyznaczono na podstawie dystansu segmentów, minimalnych wskazywanych prędkości lotu ( $IAS_{kat.A}$ ) oraz odpowiadających im prędkości rzeczywistych (TAS), tabela 5.

**Tabela 5.** Metryka oceny spełnienia warunków kategorii A (PI-3a) – czas lotu w procedurach wg minimów prędkości kategorii A

Segment / procedura / manewr	Dystans [km]	Prędkości minimalne [km/h] $IAS_{kat.A}$ (TAS)	Czas maksymalny $T_{kat.A}^{max}$ [s]
Początkowy	13,06	165 (172)	273
Nawrót podstawowy	6,16	165 (172)	129
Nawrót dwuzakrętowy (racetrack) $2 \times 180$	5,15	165 (172)	108
Zakręt 90	1,39	165 (172)	29
Pośredni*	7,65	130 (135)	204
Końcowy	10,93	130 (133)	293
Przerwany	8,00	185 (189)	152
STAR_ST	31,64		770
STAR_TR	31,39		760
STAR_BST	37,80		899
STAR_RCT	36,79		878

\* Założono prędkość IAS, ponieważ kategoria A nie definiuje segmentu pośredniego

Druga z metryk sprawdzała w poszczególnych segmentach procedur, czy prędkość wskazywana BSP w poszczególnych segmentach procedur ( $IAS_{BSP}$ ) osiąga minimalne prędkości wskazywane lotu kategorii A ( $IAS_{kat.A}$ ) – w sposób szczegółowy sprawdzano etapy realizacji procedur do lotu. Metrykę spełnienia kryterium PI-3b dano zależnością

$$IAS_{BSP} \geq IAS_{kat.A} \quad (4.9)$$

natomiast prędkości kategorii A zestawiono w tabeli 2.

#### 4.2.4. Podsumowanie kryteriów

Ocenę integracji BSP w lotach w przestrzeni kontrolowanej dokonano zgodnie z kolejnością kryteriów:

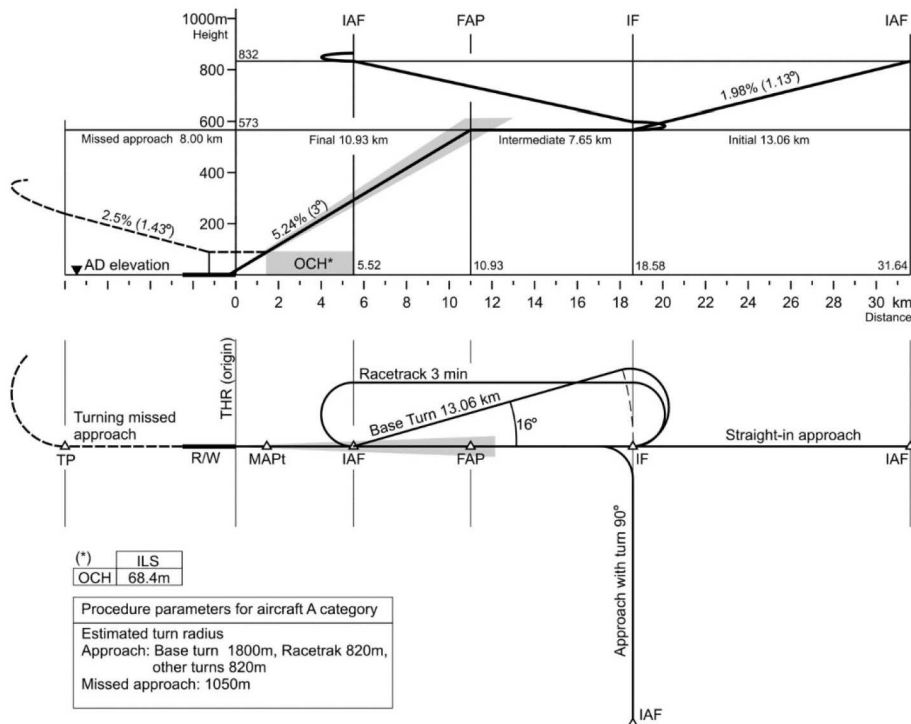
- PI-1: wg zależności (4.1),
- PI-2: wg zależności (4.3)-(4.5) oraz danych z tabeli 4,
- PI-3:
  - PI-3a: wg zależności (4.6)-(4.8) oraz danych z tabeli 5,
  - PI-3b: wg zależności (4.9) oraz danych z tabeli 2 (kategoria A).

## 5. Wnioski

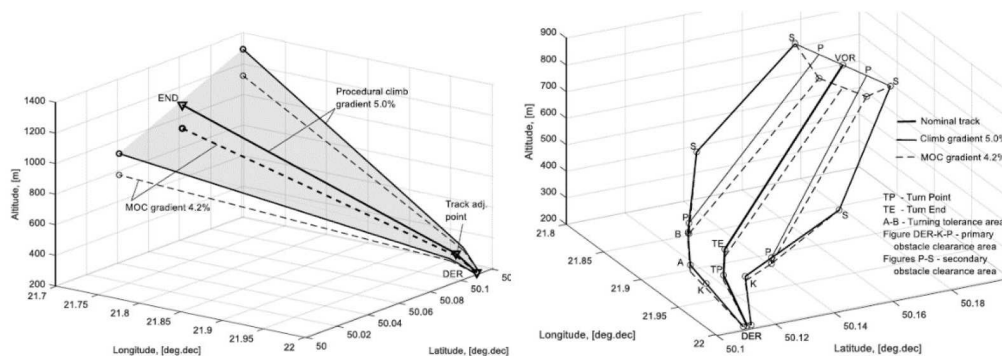
Przedstawione kryteria integracji BSP w przestrzeni kontrolowanej obejmują dwa z jedenastu kluczowych obszarów rozwoju ATM (ICAO) – bezpieczeństwo i efektywność lotów. Każdy z obszarów jest istotny z punktu widzenia osiągnięć w locie BSP, gdyż dla obiektów małych i średnich osiągnięcia te mogą być mniejsze w porównaniu do samolotów załogowych. W obszarze bezpieczeństwa kluczowym było kryterium PI-1 położenia, za pomocą którego oceniano, czy BSP jest w stanie spełnić wymagania utrzymania lotu bliskiego proceduralnej trajektorii z dala od przeszkód naziemnych. Z kolei w obszarze efektywności lotów kryterium PI-2 sprawdzało aspekty wpływu na załogowy ruch lotniczy. Przewiduje się, że to kryterium może mieć istotne znaczenie w możliwości integracji, gdyż dopuszczalne zwiększenie czasu lotu BSP względem samolotów załogowych w lotach proceduralnych jest stosunkowo niewielkie dla utrzymania minimum separacji czasowej. Kryterium PI-3 odnosi się do wymagań przestrzeni kontrolowanej, sprawdzając, czy grupa BSP jest w stanie spełnić wymagania kategorii A korespondującą z samolotami załogowymi o najmniejszym poziomie osiągnięć. Podstawową funkcją kryterium PI-3 w badaniach było określenie, czy poziom osiągnięć BSP spełnia kategorię A lub czy jest niewystarczający i wymaga prac nad określeniem kategorii dedykowanej BSP.

W kryteriach uwzględniono położenie, czas, prędkość – za ich pomocą możliwe jest powiązanie charakterystyk lotnych samolotów z aspektami zarządzania ruchem lotniczym. Wypracowane kryteria integracji w przestrzeni kontrolowanej pozwalają na ocenę grupy BSP zróżnicowanej pod względem osiągnięć, masy startowej, obciążenia powierzchni skrzydła i obciążenia mocy zespołu napędowego. Finalnie możliwa jest identyfikacja obwiedni osiągnięć decydującej o możliwości integracji z punktu widzenia części wspólnej każdego z kryteriów.

### Dodatek 1. Modele procedur referencyjnych



Rys. 10. Model procedur referencyjnych dołotu (STAR) [19]



Rys. 11. Model procedur referencyjnych odlotu (SID) prostego – lewa strona, z zakrętem – prawa strona [21]

Procedury referencyjne obejmowały 4 typy procedur dolotu (STAR), tj. podejście proste (STAR\_ST), podejście z zakrętem (STAR\_TR), podejście dwuzakrętowe „racetrack” (STAR\_RCT), podejście z nawrotem podstawowym „base turn” (STAR\_BST), rys. 10. W przypadku procedur odlotu (SID) określono odejście proste (SID\_ST) i odejście z zakrętem (SID\_TR), rys. 11.

## Bibliografia

1. DALAMAGKIDIS K., VALAVANIS K.P., PIEGL L.A., *On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System*, 2nd Ed., Springer, 2012
2. EUROCONTROL, European Operational Concept Validation Methodology, E-OCVM 3.0, Vol. I, 2010
3. EUROCONTROL, European Operational Concept Validation Methodology, E-OCVM 3.0, Vol. II – Annexes, 2010
4. EUROCONTROL, RPAS ATM CONOPS. Edition 4, 2017
5. EUROCONTROL, UAS ATM Integration – Operational Concept, Edition 1.0 (2018) – integracja
6. European Parliament and of the Council, Regulation (EU) No 216/2008 of 20 February 2008 on common rules in the field of civil aviation and establishing a European Aviation Safety Agency, EU Law Portal, eur-lex.europa.eu, Brussels, 2008
7. European Parliament and of the Council, Regulation (EU) No 2018/1139 of 4 July 2018 on common rules in the field of civil aviation and establishing a European Union Aviation Safety Agency, EU Law Portal, eur-lex.europa.eu, Brussels, 2018
8. European RPAS Steering Group, A Regulatory Approach for the integration of civil RPAS into the European Aviation System, Annex 1 of Final Report, 2013
9. European RPAS Steering Group, A Strategic R&D Plan for the integration of civil RPAS into the European Aviation System, Annex 2 of Final Report, 2013
10. European RPAS Steering Group, A study on the social impact of the integration of civil RPAS into the European Aviation System, Annex 3 of Final Report, 2013
11. European RPAS Steering Group, Roadmap for the integration of civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into European Aviation System, Final report, 2013
12. ICAO, Air Traffic Management – Procedures for Air Navigation Services, International Civil Aviation Organization, Doc. 4444, 16th edition, 2016
13. ICAO, Description of the potential performance indicators presented in the GANP 2016, International Civil Aviation Organization, Global Air Navigation Plan – Annex, 2016

14. ICAO, Manual on Global Performance of the Air Navigation System, International Civil Aviation Organization, Doc. 9883, 1st edition, 2009
15. ICAO, Procedures for Air Navigation Services – Aircraft Operations (PANS-OPS), Vol. II – Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, International Civil Aviation Organization, Doc. 8168, 5th edition, 2006
16. ICAO, Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) Concept of Operations (CONOPS) for International IFR Operations, 2017
17. Joint Air Power Competence Centre (JAPCC), Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO, Germany, 2010
18. LICHÓN D., Analysis of regulations concerning IFR flights of RPAS unmanned systems in controlled airspace, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – Transport*, **123**, 75-84, ISSN: 1230-9265, 2018
19. LICHÓN D., Modelling of the reference STARS procedures in the context of RPAS integration in non-segregated airspace, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology (AEAT)*, ISSN 1748-8842, DOI 10.1108/AEAT-12-2019-0243, 2020
20. LICHÓN D., MAJKA A.R., LIS T., *RPAS Performance Model for Fast-Time Simulation Research on Integration in Non-Segregated Airspace*, Emerald Publishing, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 95/9, 1392-1402, DOI: 10.1108/AEAT-10-2022-0288, 2023
21. LICHÓN D., ORKISZ M., Models of the reference departure and arrival IFR procedures for the purpose of research in RPAS integration in controlled airspace, *Journal of KONES*, **26**, 3, 121-128, DOI: 10.2478/kones-2019-0065, 2019
22. LISSONE M., COLIN D., BARRET P., *EUROCONTROL RPAS ATM CONOPS*, 2017 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), EUROCONTROL, Brussels, DOI: 10.1109/ICNSURV.2017.8012044, 2017
23. MAJKA A., LICHÓN D., *SESAR PJ.10-05 PROSA – Validation Report (VALP). Appendix B “Validation Exercise”*, Rzeszow University of Technology, 2019
24. Polska Agencja Żeglugi Powietrznej, AIP Polska [dostęp: [ais.pansa.pl/aip/](http://ais.pansa.pl/aip/)]
25. SESAR Joint Undertaking, European ATM Master Plan: Roadmap for the safe integration of drones into all classes of airspace, Single European Sky ATM Research, 2016
26. SESAR Joint Undertaking, European Drones Outlook Study – Unlocking the value for Europe, Single European Sky ATM Research, 2016

#### **Criteria for assessing the integration of unmanned aircraft vehicles in controlled airspace from the perspective of performance in flight**

The process of integrating unmanned aerial vehicles (UAVs) into the air traffic management system (ATM) is a response to the forecasts for the development of the civil UAV market in Europe in the perspective of 2035 and 2050 (according to SESAR program studies). The research on integration is conducted in the areas of technological challenges, legal regulations and social acceptance. The basic requirement for integration of UAVs, according to ICAO, is to meet airspace requirements and operational procedures in a manner equivalent to the manned aviation. The integration process leads to the implementation of a uniform, non-segregated airspace model for all users. The area of interest of this work is the integration of UAVs in flight operations according instrument flight rules (IFR). The aim of the work is to define criteria and metrics for assessing the integration from the point of view of UAV performance. Taking into account that UAVs are lighter objects than manned aircraft, their performance may be relatively lower. It is important to develop criteria according to which the UAV performance can be assessed with relation to airspace requirements for aircraft separation and air traffic flow. Departure and approach procedures (Standard Instrument Departure/Arrival, SID/STAR) are examined as critical space elements. The assessment criteria have been developed according to: UAV position in relation to the

procedural flight trajectory, flight time in SID/STAR procedures, compliance of the UAV with “A” category aircraft, according to ICAO. The proposed criteria correspond to selected areas of development and evaluation of ATM solutions (Key Performance Area, KPA), according to ICAO. The work combines the issues of UAV performance characteristics and ATM aspects. It is a part of research leading to the identification of the UAV performance envelope determining the possibility of integration in a unified, controlled airspace.

*Keywords:* UAV integration, non-segregated airspace, SID and STAR procedures